



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

嵌入式与工业控制技术

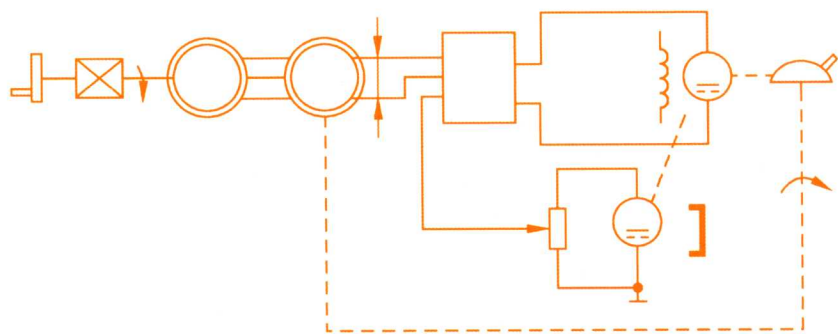
Control Motors and Special Motors

控制电机与 特种电机

(第2版)

孙冠群 李璟 蔡慧 编著

Sun Guanqun Li Jing Cai Hui



清华大学出版社





教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

Control Motors and Special Motors

控制电机与特种电机

(第2版)

孙冠群 李璟 蔡慧 编著

Sun Guanqun Li Jing Cai Hui

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统论述各种控制电机与特种电机的结构原理、特性、应用等,鉴于一些电机与其控制部分的不可分割性特点,本书对部分电机的控制系统也做了详细介绍。

全书共分 11 章,包括绪论、测速发电机、自整角机、旋转变压器、伺服电动机及其控制、步进电动机及其驱动、无刷直流电动机及其控制、开关磁阻电机及其控制、直线电动机、盘式电动机、超声波电动机及其控制;附录中给出了两个课程设计,以方便教学或实践训练。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、机械设计及其自动化等机电类专业的本科生教材或参考用书;也可作为相关科研院所及相关企业从事电气自动化技术行业的工程技术人员培训教材或参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

控制电机与特种电机/孙冠群,李璟,蔡慧编著.—2版.—北京:清华大学出版社,2016

高等学校电子信息类专业系列教材

ISBN 978-7-302-43705-5

I. ①控… II. ①孙… ②李… ③蔡… III. ①微型控制电机—高等学校—教材 IV. ①TM383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 084849 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:梁毅

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载:<http://www.tup.com.cn>,010-62795954

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:20.75 字 数:514千字

版 次:2012年12月第1版 2016年7月第2版 印 次:2016年7月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00元

产品编号:069417-01

目录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 控制电机、特种电机和传统电机的区别	1
1.2 控制电机与特种电机的种类	2
1.3 控制电机与特种电机的应用	2
1.4 控制电机、特种电机与其控制系统的关系	3
第 2 章 测速发电机	5
2.1 直流测速发电机	5
2.1.1 直流测速发电机的形式	5
2.1.2 直流测速发电机的输出特性	6
2.1.3 直流测速发电机误差原因及分析	7
2.2 交流异步测速发电机	12
2.2.1 交流异步测速发电机的结构与工作原理	12
2.2.2 交流异步测速发电机的输出特性	13
2.2.3 交流异步测速发电机的主要技术指标	14
2.3 测速发电机的应用	15
2.3.1 位置伺服控制系统的速度阻尼及校正	15
2.3.2 转速自动调节系统	16
2.3.3 自动控制系统的解算	17
本章小结	18
思考题与习题	19
第 3 章 自整角机	20
3.1 自整角机的分类和结构	20
3.1.1 自整角机的分类	20
3.1.2 自整角机的结构	22
3.2 控制式自整角机	24
3.2.1 控制式自整角机的工作原理	24
3.2.2 带有差动发送机的控制式自整角机的工作原理	29
3.3 力矩式自整角机	29
3.3.1 力矩式自整角机的工作原理	30
3.3.2 阻尼绕组	34
3.3.3 力矩式自整角机的应用	34
3.4 自整角机的选择与使用	35
3.4.1 自整角机的特点	35

3.4.2	自整机的选用	35
3.4.3	使用注意事项	36
3.5	自整角机测控系统应用举例	36
3.5.1	雷达方位角测量系统组成	36
3.5.2	自整角机的测角与控制	37
3.5.3	轴角/数字转换电路的硬件设计	37
3.5.4	软件设计	38
	本章小结	40
	思考题与习题	40
第4章	旋转变压器	41
4.1	旋转变压器的类型和用途	41
4.2	正余弦旋转变压器	43
4.2.1	正余弦旋转变压器的结构	43
4.2.2	正余弦旋转变压器的工作原理	45
4.2.3	正余弦旋转变压器补偿方法	49
4.3	线性旋转变压器	51
4.3.1	线性旋转变压器的结构	51
4.3.2	线性旋转变压器的工作原理	52
4.4	旋转变压器的使用	53
4.4.1	工作方式	53
4.4.2	旋转变压器的选择和使用	54
4.4.3	旋转变压器的误差	55
4.5	旋转变压器的应用举例	56
4.5.1	旋转变压器在角度测量系统中的应用	56
4.5.2	旋转变压器在解算装置中的应用	58
	本章小结	61
	思考题与习题	61
第5章	伺服电动机及其控制	63
5.1	直流伺服电动机及其控制	66
5.1.1	直流伺服电动机的结构和分类	66
5.1.2	直流伺服电动机的控制方式	67
5.1.3	直流伺服电动机的稳态特性	68
5.1.4	直流伺服控制技术	70
5.2	直流伺服电动机的应用	72
5.2.1	在位置控制系统中的应用	73
5.2.2	在速度控制系统中的应用	73
5.2.3	在张力控制系统中的应用	74
5.2.4	在自动检测装置中的应用	74
5.2.5	基于 DSP 的直流伺服电动机系统	74
5.3	异步伺服电动机及其控制	76
5.3.1	异步伺服电动机的结构与分类	76
5.3.2	异步伺服电动机的控制	78
5.3.3	异步伺服电动机的静态特性	79

5.3.4	异步伺服电动机和直流伺服电动机的性能比较	81
5.4	异步伺服电动机的应用	82
5.4.1	在位置控制系统中的作用	82
5.4.2	在检测装置中的应用	83
5.4.3	在计算装置中的应用	84
5.4.4	在增量运动的控制系统中的应用	84
5.5	永磁同步伺服电动机及其控制	85
5.5.1	永磁同步伺服电动机的结构与分类	85
5.5.2	永磁同步伺服电动机的工作原理	89
5.5.3	永磁同步伺服电动机的稳态性能	91
5.5.4	永磁同步伺服电动机的数学模型	94
5.5.5	永磁同步伺服电动机的矢量控制策略	101
5.6	永磁同步伺服电动机系统设计	106
5.6.1	永磁同步伺服电动机系统的理论设计	106
5.6.2	永磁同步伺服电动机的 DSP 控制设计	110
	本章小结	121
	思考题与习题	121
第 6 章	步进电动机及其驱动	123
6.1	步进电动机的分类及结构	124
6.1.1	步进电动机的分类	124
6.1.2	步进电动机的结构	125
6.2	反应式步进电动机的工作原理	126
6.2.1	通电方式分析	127
6.2.2	小步距角步进电动机	129
6.2.3	步进电动机的基本特点	130
6.3	反应式步进电动机的运行特性	132
6.3.1	静态运行特性	132
6.3.2	动态运行特性	138
6.3.3	主要性能指标	144
6.4	步进电动机的驱动控制	145
6.4.1	驱动控制器	145
6.4.2	功率驱动电路	146
6.5	步进电动机的应用	152
6.5.1	用于电子计算机的外部设备	152
6.5.2	用于数字程序控制系统	153
6.5.3	用于点位控制的闭环控制系统	154
	本章小结	154
	思考题与习题	155
第 7 章	无刷直流电动机及其控制	157
7.1	无刷直流电动机的基本结构和工作原理	157
7.1.1	无刷直流电动机的基本结构	157
7.1.2	无刷直流电动机的工作原理	159
7.2	无刷直流电动机的运行特性	160

7.2.1	无刷直流电动机的基本方程	160
7.2.2	无刷直流电动机特性分析	162
7.3	无刷直流电动机的控制方法	164
7.3.1	最简控制方式	164
7.3.2	调压控制方式	164
7.3.3	电流滞环 PWM 控制方式	165
7.3.4	无刷直流电动机的四象限运行控制过程	166
7.4	无刷直流电动机的无位置传感器控制	167
7.4.1	基于反电动势过零点的转子位置检测	167
7.4.2	续流二极管法	168
7.4.3	基于反电动势积分的转子位置检测	169
7.4.4	基于反电动势三次谐波的转子位置检测	169
7.4.5	状态观测器法	170
7.4.6	基于磁链函数的转子位置检测方法	170
7.5	无刷直流电动机专用驱动控制集成电路	171
7.5.1	MC33035	171
7.5.2	EC302	176
7.6	基于 TMS320F2812 DSP 的无刷直流电动机控制系统	182
7.6.1	控制器方案设计	182
7.6.2	控制器硬件设计	184
7.6.3	控制器软件设计	190
7.6.4	系统应用软件总体结构	193
7.6.5	控制器系统控制策略	195
7.7	无刷直流电动机转矩脉动抑制方法举例	202
7.7.1	无刷直流电机控制模型	203
7.7.2	非换相区转矩脉动形成原因分析	204
7.7.3	换相区转矩脉动形成原因分析	205
7.7.4	非换相区转矩脉动抑制方法	206
7.7.5	换相区转矩脉动抑制方法	207
7.7.6	实验结果	209
7.8	无刷直流电动机控制系统的应用与发展	211
	本章小结	212
	思考题与习题	212
第 8 章	开关磁阻电机及其控制	214
8.1	开关磁阻电动机驱动控制系统构成与工作原理	217
8.1.1	SRD 系统的基本构成	217
8.1.2	SR 电动机的运行原理	219
8.1.3	SRD 系统与其他系统的比较	220
8.2	开关磁阻电动机的控制方式	222
8.2.1	SR 电动机的数学模型	223
8.2.2	SRD 系统的调速控制方式	225
8.2.3	基于模糊控制算法的 SRD 系统控制方式	228
8.3	SRD 系统功率变换器	230

8.3.1	功率变换器主电路	231
8.3.2	SRD 功率变换器设计实例	233
8.4	开关磁阻电动机控制器	237
8.4.1	控制器硬件设计	238
8.4.2	SRD 系统软件设计	245
8.5	开关磁阻发电机	252
8.5.1	开关磁阻发电机的运行原理	252
8.5.2	开关磁阻发电机系统的构成	253
8.5.3	开关磁阻发电机的控制策略	254
8.6	开关磁阻电动机及其控制的发展	254
	本章小结	255
	思考题与习题	255
第 9 章	直线电动机	257
9.1	直线电动机的基本结构	259
9.2	直线感应电动机	262
9.2.1	旋转感应电机的基本工作原理	262
9.2.2	直线感应电动机的基本工作原理	262
9.3	直线直流电动机	264
9.3.1	永磁式直线直流电动机	264
9.3.2	电磁式直线直流电动机	265
9.4	直线同步电动机	265
9.5	直线步进电动机	266
9.6	直线电动机的应用	268
9.6.1	作为直线运动的执行元件	268
9.6.2	用于机械加工产品	268
9.6.3	用于信息自动化产品	269
9.6.4	用于长距离的直线传输装置	271
9.6.5	用于高速磁悬浮列车	272
	本章小结	274
	思考题与习题	274
第 10 章	盘式电动机	276
10.1	盘式电动机概况	276
10.2	盘式直流电动机	277
10.2.1	盘式直流电动机的结构特点	277
10.2.2	盘式直流电动机的基本电磁关系	279
10.3	盘式同步电动机	280
10.4	盘式电动机的发展	283
	本章小结	286
	思考题与习题	286
第 11 章	超声波电动机及其控制	287
11.1	超声波电动机概述	287
11.1.1	超声波电动机发展历史	288

11.1.2 超声波电动机的特点	289
11.1.3 超声波电动机的分类	291
11.2 行波型超声波电动机	291
11.2.1 行波型超声波电动机的结构特点	291
11.2.2 行波型超声波电动机的运行机理	292
11.2.3 行波型超声波电动机的驱动控制	295
11.3 超声波电动机的应用	298
11.4 超声波电动机的发展方向	301
本章小结	302
思考题与习题	302
附录 A 课程设计	303
A.1 步进电动机驱动系统设计	303
A.1.1 设计背景	303
A.1.2 设计要求	303
A.1.3 设计原理	303
A.1.4 分组说明	306
A.1.5 设计报告说明	306
A.2 永磁无刷直流电动机控制系统设计	306
A.2.1 设计背景	306
A.2.2 设计要求	306
A.2.3 设计原理	307
A.2.4 分组说明	309
A.2.5 设计报告说明	310
附录 B 部分思考题与习题参考答案	311
参考文献	314

通过对“电机学”或“电机与拖动”课程的先期学习,我们掌握了传统电机的结构、原理、电磁关系、特性与应用等基础知识,本书将全面论述传统电机之外的控制电机、特种电机及其控制系统。

与传统感应电机、同步电机、直流电机和变压器相比,在工作原理、励磁方式、技术性能以及在结构上有较大特点的电机可以统称为特殊电机,这些特殊电机中相当一部分的电机本体与控制部分已经一体化,因此有必要在本书中讲授这些电机及其控制部分。

1.1 控制电机、特种电机和传统电机的区别

在各类自动化系统中,需要用到大量的各种各样的元件,控制电机就是其中的重要元件之一。它属于机电元件,在系统中具有执行、检测和解算的功能。虽然从基本原理来说,控制电机与普通传统旋转电机并没有本质上的差别,但后者着重于对电机的力能指标方面的要求,而前者着重于对特性、高精度和快速响应方面的要求。

一般来说,与传统电机相比,在工作原理、结构、性能或设计方法上有明显不同特点的电机都属于特殊电机的范畴,为了与现有习惯性的概念称呼衔接,一般把这些特殊电机称作控制电机与特种电机,当然,原有概念的控制电机之外的特殊电机,自然叫做特种电机。

(1) 从工作原理来看,有些特殊电机已经突破了传统电机理论的范畴。例如,超声波电机不是以磁场为媒介进行机电能量转换的电磁装置,而是利用驱动部分(压电陶瓷元件的超声波振动)和移动部分之间的动摩擦力而获得运转力的一种新原理电机。

(2) 不同于超声波电机,绝大部分特殊电机是在传统电机理论的范畴内,即属于电磁电机。不过,许多电机的工作原理也具有较大的特殊性。例如,步进电机是将数字脉冲信号转换为机械角位移和线性位移的电机,如果采用高性能永磁体后,可制成永磁混合式步进电动机,并采用先进的控制技术,其技术指标和动态特性将有明显的改进和提高。开关磁阻电机是一种机电一体化的新型电机,在电机发明之后的 100 多年里,磁阻电机的效率、功率因数和功率密度都很低,长期以来只能用作微型电动机,而磁阻电机与电力电子器件相结合构成的开关磁阻电机,其功率密度与普通异步电机相近,可在很宽的运行范围内保持高效率,系统总成本低于同功率的其他传动系统,目前国内最高已有 400kW 的产品出售。

(3) 从结构来看,除了传统的径向磁场旋转电机之外,还出现了许多特殊结构的电机。

例如,直线电机和横向磁场电机(盘式电机)等。

从以上的介绍可以看出,除了典型的通用直流电机、异步电机、同步电机和静止变压器等之外,其他类型的电机都可以归为特殊电机的行列,这意味着控制电机也可以列为特殊电机的序列。但是,由于控制电机的称呼历史较长,在我国高等教育自动化类专业的教学中,一直以来是一门不可或缺的课程。在这里,我们习惯上称控制电机之外的非传统电机为特种电机,控制电机则定义为自动化系统中常用的微型特殊电机。

1.2 控制电机与特种电机的种类

与传统电机相比,控制电机和特种电机的特点还表现在种类繁多(目前约有 5000 多个品种)和功能多样化上,而且还在不断产生功能特殊、性能优越的新颖电机,因此不论从原理和结构,还是从功能和使用等方面对其进行严格的分类都是比较困难的。通常情况下,根据上一节的定义,控制电机属于在自动化系统中具有执行、检测和解算功能的电机,一般包括直流测速发电机、直流伺服电动机、交流异步伺服电动机、旋转变压器、自整角机、步进电动机和直线电动机等;特种电机与多数传统电机一样,注重力能指标,包括开关磁阻电动机、永磁无刷直流电动机、交流永磁同步伺服电动机、盘式电动机和超声波电动机等。依用途而分,部分电机既可称为控制电机也可以称为特种电机,如永磁无刷直流电动机和交流永磁同步伺服电动机在从事检测功能时可划入控制电机的范畴,又如部分直线电动机进行大力矩的运动传递时,就属于特种电机范畴。

因此,特意区分控制电机和特种电机意义不大。本书在后续讲授过程中,将不再特别强调到底是属于控制电机还是特种电机的范畴,重要的是通过本书,将传统电机之外的常用的特殊电机及其控制系统逐一介绍给读者。

1.3 控制电机与特种电机的应用

控制电机已经成为现代工业自动化系统、现代科学技术和现代军事装备中不可缺少的重要元件。它的应用范围非常广泛,例如,自动化生产线中的机械手、火炮和雷达的自动定位、船舶方向舵的自动操纵、飞机的自动驾驶、遥远目标位置的显示、机床加工过程的自动控制与自动显示、阀门的遥控以及电子计算机、自动记录仪表、医疗设备和录音录像设备等的自动控制系统。

很多特种电机则综合了电机、计算机、新材料和控制理论等多项高新技术,具有电机与控制一体化的趋势,其应用也遍及军事、航空航天、工农业生产和日常生活的各个领域。下面逐一介绍控制电机与特种电机的应用概况。

(1) 工业控制自动化领域。随着现代工业的自动化、信息化,各类控制电机与特种电机被越来越广泛地应用,尤其以数字化形式为控制方式的现代混合式步进电动机、交流伺服电动机和直线伺服电机等应用最为广泛。当前机器人产业异军突起,而机器人的绝大部分动作都要靠控制电机与特种电机来完成。

(2) 信息处理领域。没有信息化就没有现代文明社会。信息产业在国内外都受到高度重视并获得高速发展,信息技术设备中需要的微电机的全世界需求量每年约 15 亿台(套)。

这类电机绝大部分是精密永磁无刷电动机和精密步进电动机等,例如,智能手机的振动电机、电脑的存储器驱动电机以及各类信息化终端产品,等等。

(3) 交通运输领域。目前,在高级汽车中,出于控制燃料和改善乘车感觉以及显示有关装置状态的需要,要使用40~50台电动机,豪华轿车上的电机则可多达80台,汽车电器配套电机主要是永磁直流电机和无刷直流电机等。另外,作为21世纪的绿色交通工具,电动汽车在各国受到普遍的重视,电动车辆驱动用电机主要是无刷直流电动机、开关磁阻电动机和永磁同步电动机等,这类电机的发展趋势是高效率、高出力和智能化。此外,特种电机在高铁列车牵引和轮船电力推进中也得到了越来越广泛的应用,例如,直线电动机用于磁悬浮列车和地铁列车的驱动也已经在我国进入商业应用阶段。

(4) 家用电器领域。目前,工业化国家一般家庭中约用到35台以上特种电机。为了满足用户越来越高的要求并适应信息时代的发展,实现家电产品节能化、舒适化、网络化和智能化,甚至提出了网络家电(或信息家电)的概念,家电更新换代的周期很短,对其配套的电机提出了高效率、低噪声、低振动、低价格、可调速和智能化的要求。无刷直流电动机和开关磁阻电动机等新兴的机电一体化产品正逐步替代传统的单相异步电动机并在家用电器领域中一展身手。

(5) 高档消费品领域。光驱、存储视盘等音响设备的配套电机主要为印刷绕组电机和绕线盘式电机等,摄像机和数码单反照相机等高档电子消费产品需要量大,产品更新换代快,这也是微特电机的主要应用领域之一,这类电机属于精密型电机,制造加工难度大,尤其进入数字化后,对电机提出了更苛刻的要求。

(6) 电气传动领域。工农业生产的各个部门都离不开电气传动系统,在要求速度控制与位置控制(伺服)的场合,特种电机的应用越来越广泛。例如,开关磁阻电机、无刷直流电机、功率步进电机、宽调速直流电机等在数控机床、自动生产线和风机水泵等在电气传动领域应用广泛。

(7) 特种用途,包括各种飞行器、探测器、自动化武器装备和医疗设备等。特种用途所需电机种类繁多,各自有不同要求,这些电机包括一些从原理上、结构上和运行方式上都不同于一般电磁原理的电机,例如,低速同步电动机、谐波电动机、有限转角电动机、超声波电动机、微波电动机、电容式电动机和静电电动机,等等。

1.4 控制电机、特种电机与其控制系统的关系

不管是控制电机还是特种电机,与普通圆柱式交直流电机相比,它们都有其特殊性,其中相当部分的电机需要借助于电机运行状态反馈信息后才能进行控制并继续运行。例如,开关磁阻电机如果没有转子位置信号的信息,电机将无法启动并运转;无刷直流电机和永磁交流同步电机等如果没有转子位置的信号将不能如期发挥其伺服作用;还有的电机需要给定特殊的可调控的信号,如步进电机若无脉冲信号则不能步进。因此,相当部分的控制电机、特种电机与其控制系统是密不可分的,因此单独认识电机本体而不能理解其控制原理是不可取的,换言之,脱离系统来单独谈这些电机是没有实际意义的。

在早期,由于用于电机控制的器件和控制理论等的滞后,严重影响了这些电机的性能、技术与推广应用。随着新型电力电子器件的不断涌现,电机控制技术飞速发展,微处理

器的应用促进了模拟控制系统向数字控制系统的转化,数字化控制技术使得电机控制所需的复杂算法得以实现,极大地简化了硬件设计,降低了成本,提高了精度。特别是最近几年,工业控制的功能模块或专用芯片不断涌现,例如,美国的 AD 公司和 TI 公司都推出了用于电动机调速的数字信号处理器(DSP),它将一系列外围设备如模/数转换器(A/D)、脉宽调制发生器(PWM)和 DSP 集成在一起,为电机控制提供了一个理想的解决方案。以开关磁阻电机控制为例,其常用的控制方法是电流模拟滞环控制和电压 PWM 调速控制。过去这种电压 PWM 控制策略都是通过分散的模拟器件实现的,因此系统往往是电流开环,电流的大小和波形都缺乏相应的控制,最终影响整个系统的运行性能。数字信号处理技术的快速发展以及高速、高集成度的电机控制专用 DSP 芯片的出现,不仅为开关磁阻电机的数字电流控制提供了强有力的支持,而且在电压 PWM 控制的基础上引入电流闭环,实现了数字化,从而使得电流以最小的偏差逼近目标值,对提高电机出力和效率,降低电机噪声和转矩脉动有很大作用。

因此,无论是新型电机还是传统的控制电机或特种电机,控制系统俨然已经成为电机不可或缺的一部分。本书对部分电机的控制方法也进行了详细介绍。

测速发电机(tachogenerator)是自控系统的常用元件,是一种检测机械转速的电磁装置。测速发电机的转轴和被测对象的转轴用联轴器连接在一起,可以把输入机械转速信号转换成电压信号输出,输出电压与输入的转速成正比关系(如图 2-1 所示),用于测量旋转体的转速,也可作为速度信号的传送器。在自动控制系统和计算装置中一般作为测速元件、校正元件、解算元件和角加速度信号元件等。

自动控制系统对测速发电机的要求,主要是精确度高、灵敏度高、可靠性高等,具体要求如下:

- (1) 输出电压与转速保持良好的线性关系;
- (2) 剩余电压(转速为零时的输出电压)要小;
- (3) 输出电压的极性 or 相位能反映被测对象的转向;
- (4) 温度变化对输出特性的影响小;
- (5) 输出电压的斜率大,即转速变化所引起的输出电压的变化要大;
- (6) 摩擦转矩和惯性要小。

此外,还要求它的体积小、重量轻、结构简单、工作可靠、对无线电通信的干扰小、噪声小等。

在实际应用中,不同的自动控制系统对测速发电机的性能要求各有所侧重。例如,作解算元件时,对线性误差、温度误差和剩余电压等都要求较高,一般允许在千分之几到万分之几的范围内,但对输出电压的斜率要求却不高;作校正元件时,对线性误差等精度指标的要求不高,而要求输出电压的斜率要大。

测速发电机按输出信号的形式,可分为直流测速发电机和交流测速发电机两大类。

2.1 直流测速发电机

2.1.1 直流测速发电机的形式

直流测速发电机实际上是一种微型直流发电机,按励磁方式可分为以下两种形式。

- (1) 电磁式直流测速发电机。表示符号如图 2-2(a)所示。定子常为二极,励磁绕组由

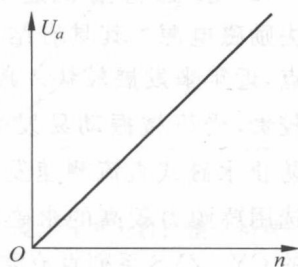


图 2-1 测速发电机输出电压与输入转速的关系

外部直流电源供电,通电时产生磁场。目前,我国生产的 ZCF 系列直流测速发电机为电磁式,实物如图 2-3 所示。

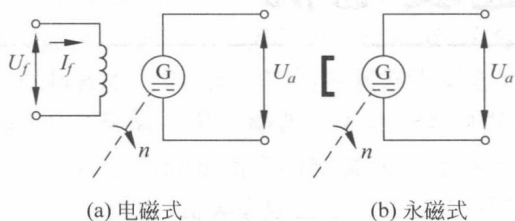


图 2-2 直流测速发电机

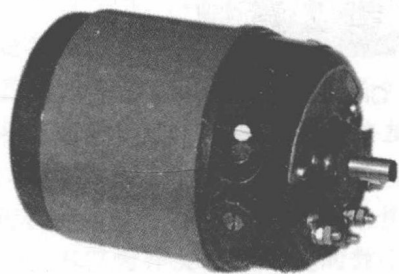


图 2-3 ZCF 系列直流测速发电机

(2) 永磁式直流测速发电机。定子磁极由永久磁钢做成。由于没有励磁绕组,所以可省去励磁电源。其具有结构简单、使用方便等特点,近年来发展较快。缺点是永磁材料的价格较贵,受机械振动易发生程度不同的退磁。为防止永磁式直流测速发电机的特性变坏,必须选用矫顽力较高的永磁材料。目前,我国生产的 CY、ZYS 系列直流测速发电机为永磁式,实物如图 2-4 所示。

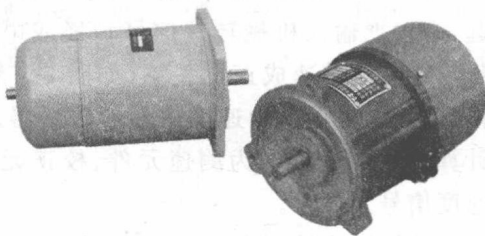


图 2-4 CY、ZYS 系列直流测速发电机

2.1.2 直流测速发电机的输出特性

测速发电机输出电压和输入转速的关系,即 $U = f(n)$ 称为输出特性(output characteristic)。直流测速发电机的工作原理与普通直流发电机相同。

在他励直流发电机中电枢反电动势为

$$E_a = C_e \phi n \quad (2-1)$$

式中, C_e 为电动势系数; ϕ 为磁通; n 为旋转机械的转动速度。

空载时,流过电枢的电流 $I_a = 0$,对应的直流测速发电机的输出电压和电枢感应电动势相等,因而输出电压与转速成正比。当电枢端外接其他负载时,如图 2-5 所示,因为电枢电流 $I_a \neq 0$,对应直流测速发电机的输出电压为

$$U = E_a - I_a R_a = E_a - \frac{U}{R_L} R_a \quad (2-2)$$

式中, R_a 为电枢回路的总电阻,它包括电枢绕组的电阻、电刷和换向器之间的接触电阻; I_a 为电枢总电流; R_L 为测速发电机的负载电阻。

由于电阻 R_a 上有电压降,测速发电机的输出电压比空载时小。移项整理有

$$U = \frac{E_a}{1 + \frac{R_a}{R_L}} = \frac{C_e \phi n}{1 + \frac{R_a}{R_L}} = K n \quad (2-3)$$

式中, K 为测速发电机的电压系数,即

$$K = \frac{C_e \phi}{1 + \frac{R_a}{R_L}}$$

K 为测速发电机输出特性的斜率。当不考虑电枢反应,且认为 ϕ 、 R_a 和 R_L 都能保持为常数,斜率 K 也是常数,输出特性便有线形关系。对于不同的负载电阻 R_L ,对应的测速发电机输出特性的斜率也不同,并且其随负载电阻的增大而增大,如图 2-6 中的实线所示。

实际中的直流测速发电机的输出特性 $U_a = f(n)$ 并不是严格的线性特性,而与线性特性之间存在有误差,如图 2-6 中的虚线所示,尤其在测量高转速时,误差会增大,后面将对误差作详细分析。

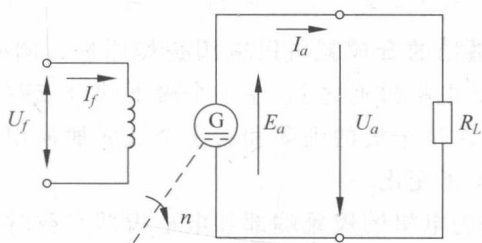


图 2-5 直流测速发电机带负载输出特性原理图

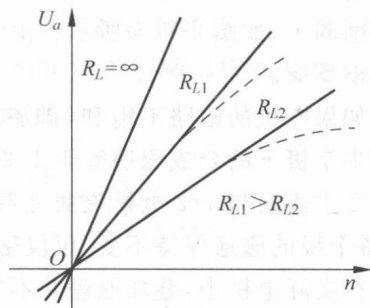


图 2-6 直流测速发电机的输出特性

2.1.3 直流测速发电机误差原因及分析

1. 电枢反应的影响

电机空载时,只有励磁绕组产生主磁场。电机负载时,电枢绕组中流过电流也要产生磁场,称为电枢磁场。所以负载运行时,电机中的磁场是主磁场和电枢磁场的合成。图 2-7(a) 是定子励磁绕组产生的主磁场,图 2-7(b) 是电枢绕组产生的电枢磁场,图 2-7(c) 是主磁场和电枢磁场的合成磁场。

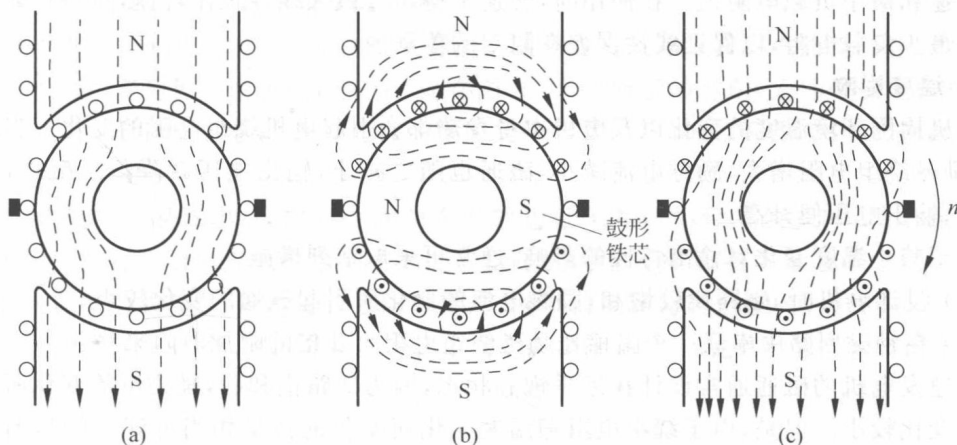


图 2-7 直流电机磁场

由于电枢导体的电流方向总是以电刷为其分界线,即电刷两侧导体中的电流大小相等、方向相反。不论转子转到哪个位置,电枢导体电流在空间的分布情况始终不变。因此,电枢电流所产生的磁场在空间的分布情况也不变,即电枢磁场在空间是固定不动的恒定磁场。其磁力线的分布可以根据右手螺旋定则作出,如图 2-7(b)所示。由于电刷位于几何中性线上,所以电枢磁场在电刷轴线两侧是对称的,电刷轴线就是电枢磁场的轴线。

由图 2-7(b)可以看出,电枢磁场也是一个两极磁场,主磁极轴线的左侧相当于该磁场的 N 极,右侧相当于 S 极。另外,在每个主磁极下面,电枢磁场的磁通在半个极下由电枢指向磁极,在另外半个极下则由磁极指向电枢,即半个极下电枢磁通和主磁通同向,另外半个极下电枢磁通和主磁通反向,因此合成磁场的磁通密度在半个极下是加强了,在另外半个极下是削弱了,如图 2-7(c)所示。由于电枢磁场的存在,气隙中的磁场发生畸变,这种现象称为电枢反应。

如果电机的磁路不饱和(即磁路为线性),磁场的合成就可以应用叠加原理。例如,N 极右半个极下的合成磁通等于 $1/2$ 主磁通与 $1/2$ 电枢磁通之和,左半个极下的合成磁通等于 $1/2$ 主磁通与 $1/2$ 电枢磁通之差。因此,N 极左半个极的削弱和右半个极的加强相互抵消,整个极的磁通保持不变,仅仅磁场的分布发生了变化。

在实际电机中,叠加原理并不完全适用。因为电机的极靴端部和电枢齿部空载时就比较饱和,加上电枢磁通以后,N 极右半极由于磁通变大,磁路将更加饱和,磁阻变大,合成磁通要小于 $1/2$ 主磁通与 $1/2$ 电枢磁通之和。左半极由于磁通变小,磁路饱和程度降低,合成磁通等于 $1/2$ 主磁通与 $1/2$ 电枢磁通之差。就是说,N 极左半极磁通的减少值大于右半极磁通的增加值,因此 N 极总的磁通有所减小。同理,S 极的情况也是如此。由此可知,电枢对主磁场有去磁作用。所以,即使电机励磁电流不变,其空载时的磁通和有载时的合成磁通是不相等的。因此,在同一转速下,空载时的感应电动势和有载时的感应电动势也不相等。负载电阻越小或转速越高,电枢电流就越大,电枢反应去磁作用越强,磁通被削弱得越多,输出特性偏离直线越远,线性误差越大(见图 2-6)。

为了减小电枢反应对输出特性的影响,在直流测速发电机的技术条件中给出最大线性工作转速和最小负载电阻值。在使用时,转速不得超过最大线性工作转速,所接负载电阻不得小于最小负载电阻,以保证线性误差在限定的范围内。

2. 温度影响

电机周围环境温度的变化以及电机本身发热都会引起电机绕组电阻的变化。当温度升高时,励磁绕组电阻增大,励磁电流减小,磁通也随之减小,输出电压就降低。反之,当温度下降时,输出电压便升高。

为了减小温度变化对输出特性的影响,通常可采取下列措施。

- (1) 设计电机时,磁路比较饱和,励磁电流的变化所引起磁通的变化较小。
- (2) 在励磁回路中串联一个阻值比励磁绕组电阻大几倍的附加电阻来稳流。

测速发电机的磁通通常设计在近乎饱和状态,因为磁路饱和后,励磁电流变化所引起的磁通的变化较小。但是,由于绕组电阻随温度变化而变化的数量相当可观,例如,铜绕组的温度增加 25°C ,其阻值便增加 10% ,因此温度变化仍然对输出电压有影响。以一台 ZCF16 型号的直流测速发电机为例,如在室温下(17°C)合闸,调节励磁电流 $I_f = 300\text{mA}$,转速为 2400r/min ,其输出电压是 55V ,1 小时后再观察,见 I_f 已降至 277mA (期间保持励磁电压和